

DOI: 10.7667/PSPC180109

考虑风速风向联合分布的大风灾害下 电力断线倒塔概率预测

朱凌¹, 陈涛威¹, 周晨², 邓红雷², 夏桥²

(1. 广东电网公司惠州供电局, 广东 惠州 516001; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对实际线路风速与风向数据很难获取、现有大风灾害下断线倒塔概率预测误差偏高的不足, 提出了考虑风速风向相关性的电力断线倒塔概率预测模型。该模型采用风速概率密度函数和风向频度的乘积表示联合概率密度函数, 计算输电线路高度各风向的有效最优概率分布类型及参数。利用输电线路风荷载模型和铁塔风荷载模型计算得到各个方向下线路和铁塔能承受的最大风速。对数值天气预报数据进行处理, 采用高度修正和插值映射后的预报风速数据作为输入参数, 实现线路气象数据不足时风灾下电力断线倒塔的概率高精度预测。

关键词: 大风灾害; 风速风向联合分布; 概率性分析; 断线倒塔; 数值天气预报

Probability prediction of transmission line breakage and tower topple over under wind disaster considering the joint distribution of wind speed and wind direction

ZHU Ling¹, CHEN Taowei¹, ZHOU Chen², DENG Honglei², XIA Qiao²

(1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516001, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In view of the deficiencies that it is difficult to obtain the data of the wind speed and direction of the actual line and the prediction error of transmission line breakage and tower topple over is higher than that of the existing wind disaster, a probability prediction model of transmission line breakage and tower topple over with the correlation of wind speed and wind direction is proposed. The model uses the product of wind speed probability density function and wind direction frequency to express the joint probability density function and calculate the effective optimal probability distribution types and parameters of each wind direction of transmission line height. The wind load model of transmission lines and the wind load model of the tower are used to calculate the maximum wind speed that the lines and the towers can bear under each direction. Through processing numerical weather forecast data and taking the altitude correction and interpolation mapping after forecasting wind speed data as input parameters, it achieves the probability prediction of transmission line breakage and tower topple over when the line meteorological data is insufficient.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. 031300KK52160012).

Key words: windstorm; joint distribution of wind speed and wind direction; probabilistic analysis; line damage and tower collapse; numerical weather prediction

0 引言

大风灾害是危及电网尤其是架空输电线路安全运行的突出问题之一。风灾除了容易导致风偏闪络故障外, 还容易引发断线倒塔这类恶性事故^[1-2]。断

线倒塔的主要原因是强风对架空线路造成的水平风荷载超过其相应的设计荷载或杆塔及其连接导线的垂直风荷载超过杆塔最大承受能力时发生横倾或台风时向上抽吸的虹吸效应造成的上拔风载导致塔基上拔或下沉^[3]。一旦发生断线倒塔, 不仅会影响区域供电, 且短时间内难以恢复, 加剧了电力供应的紧张局面^[4]。

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(031300KK52160012)

考虑到大风灾害造成的断线倒塔事故对电网造成的严重影响,国内外广大学者对此开展了相应的研究,并取得了许多有益的成果。文献[3]预测台风及暴雨的时空演变趋势,利用指数函数拟合电力断线倒塔故障率与最大应力的关系,在线预报恶劣气象造成输电线断线、倒塔等故障率的变化。文献[5-6]考虑在极端风暴灾害下输电线路杆塔可能发生的极端事件,分析了输电线路单基杆塔各构件的风荷载水平,建立了杆塔可靠性概率计算模型;文献[7-8]基于广义帕累托分布(GPD)和 Copula 函数,提出了电力线和铁塔冰荷载、风荷载的联合概率分布计算模型,并基于此建立了冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算模型。文献[9]则利用极端学习机预测实时变化的风速,并提出电力线风荷载的实时广义极值分布,提出断线倒塔实时概率预测模型。

理想情况是获取线路现场的实际风速和风向数据,计算每基杆塔和每档导线的实际风荷载,再计算其断线和倒塌概率,但是由于测量点的限制,实际线路的风速与风向数据或者风速与导线及杆塔的夹角数据是很难获取的,因此,现有的电力断线倒塔故障率计算模型通常假定风向水平于导线或者杆塔,即只单独考虑了风速的影响,未将风速风向相关性对输电线路及铁塔的影响考虑进去,得到的其实是导线和杆塔最大风荷载,评估得到的是最大风险概率,与实际风险评估明显具有较大的差异性。

为此,本文采用数值天气预报数据,在考虑风速风向相关性的基础上建立了电力断线倒塔概率预测模型。该方法首先对数值天气预报数据进行处理,采用插值映射和高度修正后的风速数据作为断线倒塔概率预测的输入参数;根据南方电网某供电局历史风速风向数据,用极大似然法估计各风向的风速有效最优分布类型及参数,由风速条件概率密度分布和风向频度得到输电线路风速风向联合分布;结合文献[10-11]建立的输电线风荷载模型和铁塔风荷载模型,建立了基于风速风向联合分布的风灾致断线倒塔概率预测模型。

1 数值天气预报数据处理

本文利用预报风速数据计算电力断线倒塔概率,为保证准确度,采用未来 24 h 的预报数据作为输入数据,并对原始预报的风速进行海拔高度修正和插值处理。

气象部门所提供的格点预报数据中,每一个网格代表着几何尺寸为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 的地理区域。从气象部门获取的格点预报风速值不能直接用于网格中线路及杆塔的风荷载计算^[12]。需要将原始的格点预

报风速数据进行修正处理,进行高度修正和插值映射到网格中每一基杆塔的位置,以此得到更精确的风速数据。

以杆塔 T_0 为例,该杆塔经纬度坐标为 $T_0(x_0, y_0, z_0)$,该杆塔周围对应 4 个格点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 、 $P_4(x_4, y_4, z_4)$,分别读取 4 个空间点的预报风速数据,即 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 。

气象部门提供的预测风速通常是离地 10 m 高的风速值,而输电导线及杆塔多为 20~30 m,故首先应将 4 个空间点的风速数据乘以高度系数,换算至导线及杆塔高度处的预测风速,公式为^[13]

$$v_i^h = v_i \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^\mu \quad (1)$$

式中: h 为导线高度(m); μ 为地面粗糙度指数,海上、乡村、城市和大城市中心四类的地面粗糙度指数分别为 0.12、0.15、0.22 和 0.30。

进行海拔高度修正后,还要对预报风速进行插值处理,根据式(1)计算出杆塔 $T_0(x_0, y_0, z_0)$ 周围同一海拔高度平面对应的 4 个格点 $P'_i(x_i, y_i)$ 风速数据,由于五点共面,则可采用二维平面插值方法将海拔高度修正格点预报风速插值映射到网格中每一基杆塔的位置。如图 1,采用双线性插值方法^[14]进行插值。

要计算 T_0 点的值,首先在 X 方向上进行一次线性插值,使用式(2)进行计算。

$$v_{T1} = \frac{(x_2 - x_0) \times v_1^h}{(x_2 - x_1)} + \frac{(x_0 - x_1) \times v_2^h}{(x_2 - x_1)} \quad (2)$$

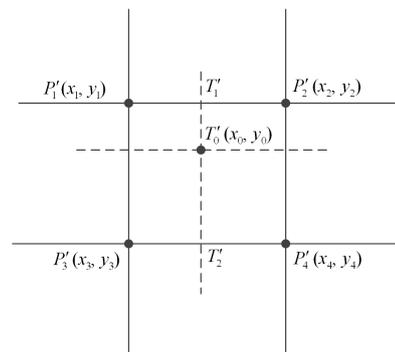


图 1 双线性插值

Fig. 1 Bilinear interpolation

同理计算 v_{T2} :

$$v_{T2} = \frac{(x_2 - x_0) \times v_3^h}{(x_2 - x_1)} + \frac{(x_0 - x_1) \times v_4^h}{(x_2 - x_1)} \quad (3)$$

再在 Y 方向上进行线性插值得到杆塔 T_0 处预报风速为

$$v_T = \frac{(y_2 - y_0) \times v_{T2}}{(y_2 - y_1)} + \frac{(y_0 - y_1) \times v_{T1}}{(y_2 - y_1)} \quad (4)$$

经过两个方向的插值后就得到了 T_0 点的值。

2 风速风向联合分布概率模型

风速和风向是风荷载的两个不可分离的参数,联合分布能够最合理、最精确地将风速和风向的联合分布规律描述出来。考虑风速风向联合作用影响的统计分析方法主要有联合分布概率模型法、最大风向系数法和平稳随机过程法^[15]。其中,联合分布概率模型法是最为有效的。

本文采用联合分布概率模型法^[16]建立风速风向联合分布概率模型,其极值分布函数是由风向频度函数和各风向风速分布函数组成的,其联合概率密度分布函数为

$$p(u, \theta) = f(\theta) \cdot f_{u|\theta}(u) \quad (5)$$

式中: $f(\theta)$ 为风向角 θ 的风向频度,反映平均风向的影响; $f_{u|\theta}(u)$ 为 θ 方向的风速条件概率密度函数,是由各个风向下的风速数据分别拟合获得。

2.1 极值风向频度函数

风向指风的来向,气象站一般以方位角的形式记录风向。目前,中国气象部门发布的气象预报普遍采用的十六方位风向^[17]。

气象站观测的风速数据一般是日最大平均风速,是当日所有风向里数值最大的风速,而进行风速风向联合分布统计分析时所需要的数据应该是所有 16 个风向的日最大风速数据和相应风向记录。考虑到日最大风速在各风向的不均匀分布,导致某些风向所抽取的样本容量过小,限制了所能抽取的极值样本数量。本文直接从整个风速数据中抽取极值样本,将风速按风向归类,各风向间的样本数量差异通过引入风向频度函数来加以考虑。

集中在每个风向 $k(1 \leq k \leq 16)$ 的观测点数为 n_k ,则各风向角频度为

$$f(\theta_k) = \frac{n_k}{\sum_{k=1}^{16} n_k} \quad (6)$$

式中, $\sum_{k=1}^{16} f(\theta_k) = 1$ 。

2.2 极值风速条件概率分布拟合

进行极值风速条件概率分布拟合时,首先引入两个假设:(1)同一地点不同方向的平均风速服从同一种类型的极值分布,并且由该地点所有各个方向上的风速记录数据样本拟合最优极值分布模型;

(2)同一地点不同方向的模型参数是相互独立的,并且由该方向的风速记录数据样本独立估计模型参数^[18]。

由于共有 16 个风向,每个风向均存在一个风速条件概率密度函数,因此共有 16 个风速条件概率密度函数的数值解。目前平均风速的分布拟合主要采用极值分布^[19],迄今为止,已有大量概率模型用于近似平均风速的概率分布,主要有 Gumbel 分布、Weibull 分布、Rayleigh 分布、GEV 分布、广义 Pareto 分布、Gamma 分布、对数正态分布和基于最大熵原理确定的分布等^[20-22]。近年来,使用较多的两种风速概率分布分别是 GEV 分布和广义 Pareto 分布。

(1) GEV 是将极值 I 型分布(Gumbel 分布)、极值 II 型分布(Fréchet 分布)和极值 III 型分布(Weibull 分布)统一到一个形式,其数学模型为^[20]

$$F(v) = \begin{cases} \exp\left[-1 + \xi\left(\frac{v-u}{\sigma}\right)^{1/\xi}\right], & \xi \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{v-u}{\sigma}\right)\right], & \xi = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: u, σ, ξ 分别为位置参数、尺度参数、形状参数,尺度参数必须大于零, $\sigma > 0$; v 为极值风速度量。当 $\xi=0$ 时, GEV 分布为 Gumbel 分布;当 $\xi < 0$ 时, GEV 分布为 Weibull 分布;当 $\xi > 0$ 时, GEV 分布为 Fréchet 分布。

其概率密度函数为

$$f(v) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-1 + \frac{1}{\xi}\left(\frac{v-u}{\sigma}\right)^{1/\xi}\right\} \cdot \left[1 + \xi\left(\frac{v-u}{\sigma}\right)^{1/\xi}\right]^{-1-1/\xi} \quad (8)$$

(2) 广义 Pareto 分布是以超出阈值的观测数据作为样本进行极值拟合。假设风速序列 $\{v\}$ 的样本个数为 N ,其分布函数为 $F(v)$,定义 $F(\bar{v})$ 为条件超限分布,它表示超过阈值的条件分布函数^[21-22],即

$$F(\bar{v}) = P\{V - u_v < \bar{v} | V > u_v\} = \frac{P\{u_v < V \leq \bar{v} + u_v\}}{P\{V > u_v\}} = \frac{F(\bar{v} + u_v) - F(u_v)}{1 - F(u_v)} = \frac{F(v) - F(u_v)}{1 - F(u_v)} \quad (9)$$

变换可得

$$F(v) = [1 - F(u_v)]F(\bar{v}) + F(u_v) \quad (10)$$

提取 $\{v\}$ 中大于 u_r 的样本, 样本个数记为 N_r ; 当 u_r 充分大时, 超额样本的分布 $F(\bar{v})$ 收敛于某一广义帕累托分布, 可得

$$F(\bar{v}) = \begin{cases} 1 - \left[1 + \xi_v \frac{\bar{v}}{\sigma_v} \right]^{-1/\xi_v}, & \xi_v \neq 0 \\ 1 - \exp \left[-\frac{\bar{v}}{\sigma_v} \right], & \xi_v = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: ξ_v 为形状参数; σ_v 为尺度参数。

利用超限样本个数, 计算 $v < u_r$ 的分布函数 $F(u_r) = 1 - N_r/N$, 代入式(11)中得到风速 $F(v)$ 的整体分布函数为

$$F(v) = \begin{cases} 1 - \frac{N_v}{N} \left[1 + \xi_v \frac{v - u_v}{\sigma_v} \right]^{-1/\xi_v}, & \xi_v \neq 0 \\ 1 - \frac{N_v}{N} \exp \left[-\frac{v - u_v}{\sigma_v} \right], & \xi_v = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其概率密度函数为

$$f(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_v} \frac{N_v}{N} \left[1 + \xi_v \frac{v - u_v}{\sigma_v} \right]^{-\frac{1}{\xi_v} - 1}, & \xi_v \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma_v} \frac{N_v}{N} \exp \left[-\frac{v - u_v}{\sigma_v} \right], & \xi_v = 0 \end{cases} \quad (13)$$

分别采用 GEV 分布和 GPD 分布概率模型对所有方向的极值风速样本进行参数估计, 对 GEV 分布采用极大似然法确定参数 u 、 σ 、 ξ 的估计值; 对 GPD 分布采用均值超额函数法确定超阈值 u_r , 再根据极大似然函数法确定参数 ξ_v 、 σ_v 的估计值, 方法详细说明参见文献[22-23]。然后采用概率曲线相关系数法^[24]作为评估模型适用性的依据, 确定极值风速样本的最优分布类型。再确定 16 个方向上的风速记录数据样本的最优分布类型参数。

3 极端风速导致的电力断线倒塔概率计算模型

3.1 各风向下电力断线倒塔临界风速

强风对架空线路造成的水平风荷载超过其相应的荷载以及杆塔及其连接导线的垂直风荷载超过杆塔最大承受能力是电力断线倒塔的主要原因。

输电线和铁塔的风荷载模型^[8-9]为

$$\begin{cases} T_{Lv} = \alpha \mu_z \beta_c S v^2 D L \sin^2 \delta / 1600 \\ T_{Tv} = \alpha v^2 \rho C_d(\alpha) A_f / 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: α 为风压不均匀系数; μ_z 为风压高度系数; β_c 为风荷载调整系数; S 为导线的体型系数; D 为

电力线直径; L 为电力线长度; δ 为风向与输电线走向间的夹角; ρ 为空气密度; $C_d(\alpha)$ 为风荷载对铁塔构件的拖动系数; A_f 为铁塔承受风压的有效面积。

在风荷载计算过程中, 规定风向角(风吹来的方向)为 θ 、线路走向角即杆塔小号侧往大号侧方向与正北方向的夹角为 β , 按顺时针计, 如图 2 所示。

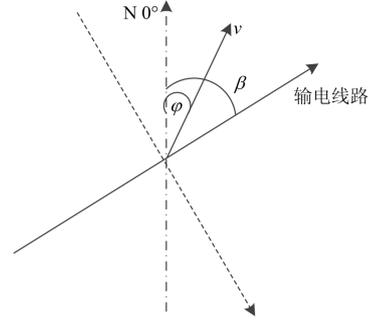


图 2 风向与线路走向夹角

Fig. 2 Angle between wind direction and line trend

则输电线路中, 风向与线路走向之间的夹角 δ 为

$$\delta = |\theta - \beta| \quad (15)$$

假设输电线路所能承受的极限风荷载为 T_{Lmax} , 可得线路所能承受的最大风速即电力断线临界风速为

$$v_{Lmax} = \sqrt{\frac{1600 T_{Lmax}}{\alpha \mu_z \beta_c S D L \sin^2 \delta}} \quad (16)$$

同理, 由铁塔所能承受的极限风荷载 T_{Tmax} , 可得电力倒塔临界风速为

$$v_{Tmax} = \sqrt{\frac{2 T_{Tmax}}{\rho C_d(\alpha) A_f}} \quad (17)$$

然后计算 16 个风向下输电线路断线倒塔临界风速。

3.2 基于风速风向联合分布的电力断线倒塔故障概率分析

经过以上处理后, 即可根据将修正后的输电线路预测风速与该线路的临界风速 v_{Lmax} 和 v_{Tmax} 进行比较, 确定未来 t 时刻下对应线路段的预测故障概率。

对输电线路, 可认为预测风速 v 小于线路临界风速 v_{Lmax} 时, 电力断线概率为 0; 预测风速 v 大于 v_{Lmax} 时, 基于风速风向联合分布的概率密度函数表示出电力断线的概率。

综上, 提出极端风速下电力断线的概率计算模型为

$$P_L = \begin{cases} 0, & v \leq v_{L\max} \\ \sum_{i=1}^{16} f(\theta_i) \int_{v_{L\max}}^v f_{\theta_i}(u) du, & v > v_{L\max} \end{cases} \quad (18)$$

同理可得出极端风速下电力倒塔的概率计算模型为

$$P_T = \begin{cases} 0, & v \leq v_{T\max} \\ \sum_{i=1}^{16} f(\theta_i) \int_{v_{T\max}}^v f_{\theta_i}(u) du, & v > v_{T\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $f(\theta_i)$ 为 θ_i 方向的风向频度; $f_{\theta_i}(u)$ 为 θ_i 方向的风速概率密度函数。

同时由于线路上风速由气象站提供, 必须考虑气象预报的准确率 $P(w)$ 。数值天气预报是气象站以气象观测资料为初值条件, 通过巨型计算机进行数值计算, 再用流体力学和热力学的方程组进行求解, 进而预测未来一定时段的大气运动状态。我国的短期气象预报的准确度已达到较高水平, 气象预报的准确度与预报时间长短是呈负相关的。气象预报准确率由气象局根据历史气象预报数据得到, 即气象预报正确的次数与预报总次数的百分比, 通常 24 h 内气象预报准确率可取 0.9, 72 h 内可取 0.8^[25], 电力断线倒塔预测概率为

$$P'_L = P(w)P_L \quad (20)$$

$$P'_T = P(w)P_T \quad (21)$$

4 实例研究

本文以南方电网某供电局为例, 该供电局辖下某 220 kV 输电线路于 2016 年 7 月 2 日 10:09 发生断线倒塔跳闸故障, 重合不成功, 故障区段当天的天气情况为台风天。由于故障杆塔处无微气象在线监测装置, 故采用本文提出的电力断线倒塔预测算法, 从气象部门获取该地区 7 月 2 日的历史格点预报数据, 通过本文的预测模型来实现此次故障的重演。

步骤 1) 以该市内气象站 2006 年 1 月 1 日至 2016 年 6 月 30 日的日最大风速值(10 min 平均时距)和相应风向记录(共 16 个方位)为数据样本, 将风速换算到故障线路高度处, 计算极值风向的分布频度。分别采用 GEV 和 GPD 这两种风速分布模型, 采用极大似然法拟合各风向区间内风速概率分布参数, 对所有风向(下文称为全方向)的极值风速样本进行参数估计并计算相关系数 r , 其结果见表 1, 分布曲线如图 3。

表 1 极值风速分布模型的拟合参数

分布形式	形状参数	尺度参数	位置参数	r
GEV	0.044 18	2.104 7	6.115 9	0.989 2
GPD	-0.076 34	3.424 9	5.2	0.987 6

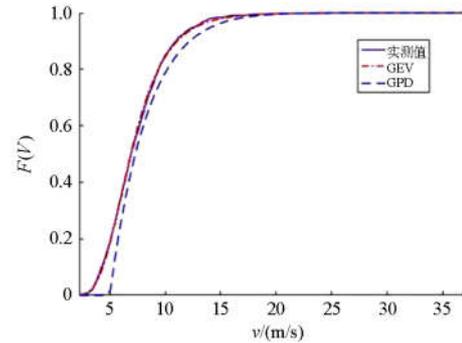


图 3 极值风速分布模型与实测值的分布曲线对比

Fig. 3 Distribution curves' comparison of probabilistic models and measured data for extreme speed

由表 1 和图 3 可知, 在两种条件风速分布概率模型当中, 该极值风速样本更接近于 GEV 分布。对 16 个方向的风速极值样本分别进行 GEV 分布概率模型的参数估计, 结果见表 2, 图 4 为风向频度分布图。

表 2 各风向内风速条件概率密度模型的参数

风向	$f(\theta)$	GEV 分布		
		ξ	σ	μ
N	0.024 25	-0.030 58	2.284 1	7.168 5
NNE	0.144 1	-0.009 629	2.371 2	7.129 8
NE	0.173 3	-0.115 7	2.259 9	6.287 6
ENE	0.050 64	0.210 8	1.509 4	4.951 4
E	0.010 70	0.363 9	1.453 8	4.902 8
ESE	0.112 0	0.075 9	1.656 1	5.289 8
SE	0.155 5	-0.005 412	1.161 5	5.624 1
SSE	0.045 65	-0.071 13	1.626 7	6.045 9
S	0.067 05	-0.241 4	2.287 5	7.052 0
SSW	0.039 94	-0.119 3	2.011 9	7.082 5
SW	0.027 82	-0.055 26	1.862 5	6.871 0
WSW	0.034 95	0.074 48	2.668 6	7.340 8
W	0.022 82	0.145 1	2.545 0	6.776 7
WNW	0.043 51	0.198 3	2.182 8	6.176 9
NW	0.040 66	0.165 5	2.177 0	5.572 6
NNW	0.071 33	0.149 9	2.676 3	6.852 3

如表 2 及式(3)可确定该 220 kV 线路故障点各风向有效最优风速风向联合概率分布模型。

步骤 2) 计算线路上各方向断线倒塔的临界风速。本文实例中, 分别取风向角为 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, \dots, 337.5^\circ$, 由极限风荷载计算这 16 个风向

算例中 220 kV 输电线路线路档 4-5 及铁塔 5 的临界风速，图 5 为故障线路档 4-5 及杆塔 5 的各方向临界风速，线路档 4-5 位于 S-N 走向，即走向角为 0°。

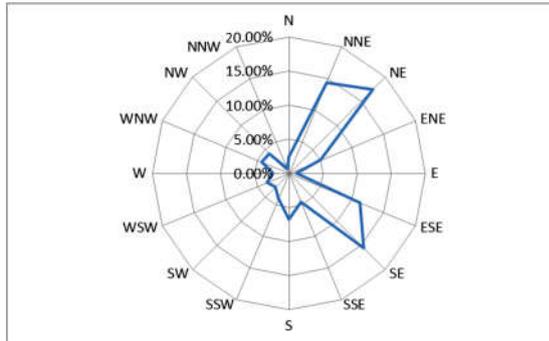


图 4 极值风速对应风向玫瑰图

Fig. 4 Wind direction rose of extreme wind

大风预报准确率 $P(w)$ 为 0.9，计算各风向的线路断线倒塔故障概率，最后得到基于风速风向联合分布的电力断线倒塔概率。图 7 为线路档 4-5 当天 10:00 各风向的断线概率，图 8 为线路档 4-5 和杆塔 5 当天不同时段总体预测故障率。

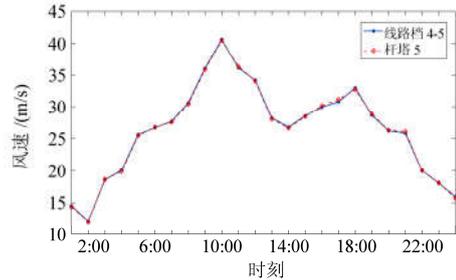


图 6 预报风速

Fig. 6 Forecast wind speed

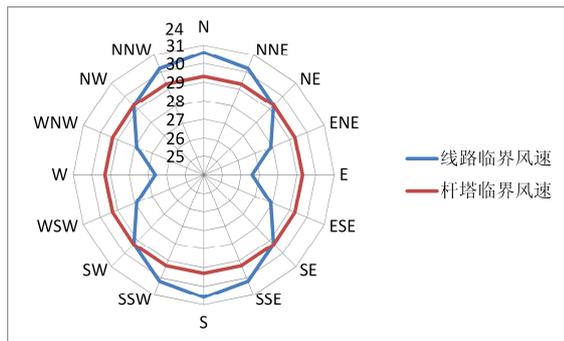


图 5 临界风速分布图

Fig. 5 Critical wind velocity distribution diagram

由图 5 可看出：线路档 4-5 的各风向出现的极值风速并不一样，当风向与线路走向垂直时，临界风速最小，这是因为风荷载在不同方向对线路产生的作用效果不同，当风向与线路走向垂直时，大风对线路造成的风荷载也最大；对于铁塔 5，各方向的临界风速基本无变化，这是因为风荷载在不同方向对它产生的效果相差不多。

步骤 3) 输入基本参数。从线路台账中读取故障线路档 4-5 和杆塔 5 处的经纬度坐标，分别查找与之相邻的 4 个格点 P1 至 P4，从气象部门获取 7 月 2 日 P1 至 P4 处的预报风速，由第 1 节所述的插值方法计算线路档 4-5 和杆塔 5 处的风速分布，如图 6。

步骤 4) 故障概率预测数据输出。故障线档 4-5 型号为 LGJ-2*400/35，线路档距为 402 m；故障杆塔 5 杆塔型号为 ZB131P，呼称高 35 m。由步骤 3) 得到的预报风速，结合 3.2 节的断线倒塔计算模型，同时由该市气象站提供的历史数据得到 24 h 风速预报正确的次数与预报总次数的百分比为 0.9，即 24 h

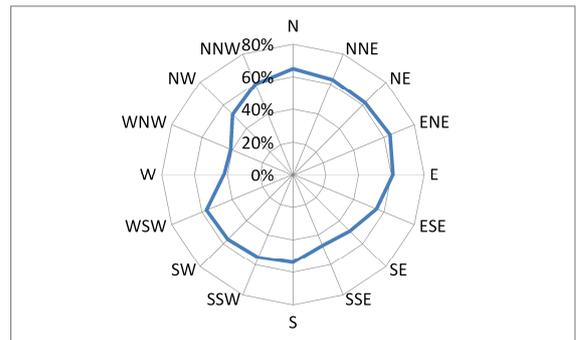


图 7 线路档 4-5 各风向的断线概率

Fig. 7 Probability of transmission line 4-5 breakage of each wind direction

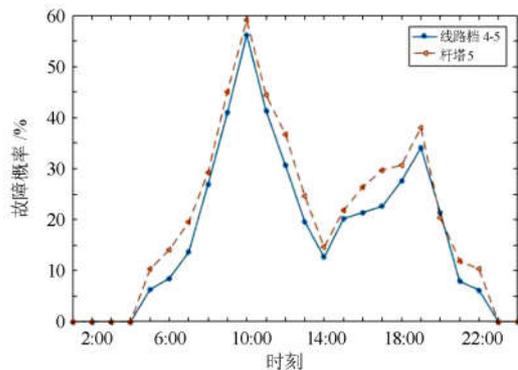


图 8 线路故障概率

Fig. 8 Line fault probability

从图 6 可以看出，故障时刻的线路档 4-5 风速达到了 39.2 m/s，杆塔 5 的风速达到了 40.3 m/s。从图 7 可看出，不同风向的线路及杆塔故障率随风向变化有所区别。从图 8 可看出，线路档 4-5 的断线故障概率和杆塔 5 的倒塔故障概率走势与气象预报风速信息一致。此模型预测出线路档 4-5 和杆塔 5

于 10:00 时刻故障概率均达到峰值,由历史故障记录得知该 220 kV 线路于 10:09 时刻发生线路档 4-5 断线故障和铁塔 5 倒塔故障。该算例结果表明,采用未来 24 h 的气象预报数据对当天的断线倒塔概率进行预测,预测结果与实际的故障情况相吻合,预测计算结果较好。

5 结论

考虑线路现场获取风速与风向数据的不足,提出了基于风速风向联合分布和概率统计方法的输电线路断线倒塔计算方法。首先,根据风速风向历史数据,计算风向频度函数,拟合极值风速条件概率分布,从而建立风速风向联合概率分布;然后引入数值天气预报数据,可不用依赖在线监测装置,利用本文建立的概率统计方法,根据 16 个方向下线路发生断线倒塔故障的临界风速,计算得到各风向的线路断线倒塔故障概率,再乘以各个方向的风向频度,然后将 16 个方向的乘积相加,就得到了基于风速风向联合分布的电力断线倒塔概率,以此实现对线路未来 24 h 断线倒塔风险的预警。与传统方法对比,本文提出的模型考虑到不同方向的风速对断线倒塔的影响,由计算得到的全方向的线路断线倒塔故障概率可对输电线路作出针对性的预防措施,同时能够为输电线路现场气象数据不足时,快速启动风灾下电力预防措施提供重要的理论依据。

参考文献

- [1] 包博,程韧俐,熊小伏,等.一种计及微地形修正的输电线路台风风险预警方法[J].电力系统保护与控制,2014,42(14):79-86.
BAO Bo, CHENG Renli, XIONG Xiaofu, et al. A typhoon risk early warning method for power transmission line considering micro-terrain correction[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 79-86.
- [2] 罗剑波,郁琛,谢云云,等.关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J].电力系统保护与控制,2018,46(6):158-170.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [3] 吴勇军,薛禹胜,谢云云,等.台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J].电力系统自动化,2016,40(2):20-29.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time evaluation for impact of Typhoon and rainstorm on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29.
- [4] 尹超雄,唐武勤,温灵锋,等.台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J].电力系统保护与控制,2018,46(4):138-143.
YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 138-143.
- [5] KRISHNASAMY S G. Assessment of weather induced transmission line loads on a probabilistic basis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2510-2516.
- [6] KUDZYS A. Safety of power transmission line structures under wind and ice storms[J]. Engineering Structures, 2005, 28(5): 682-689.
- [7] 杨洪明,黄拉,何纯芳,等.冰风暴灾害下输电线路故障概率预测[J].电网技术,2012,36(4):213-218.
YANG Hongming, HUANG La, HE Chunfang, et al. Probabilistic prediction of transmission line fault resulted from disaster of ice storm[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 213-218.
- [8] 徐文军,杨洪明,赵俊华,等.冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算[J].电力系统自动化,2011,35(1):13-17.
XU Wenjun, YANG Hongming, ZHAO Junhua, et al. Probability calculation of broken transmission lines and collapsed towers under ice storms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 13-17.
- [9] 徐文军,戴宇,建艳龙,等.风暴灾害下电力断线倒塔概率预测[J].华中电力,2012,25(3):77-81.
XU Wenjun, DAI Yu, JIAN Yanlong, et al. Probabilistic forecasting of transmission line damage and tower collapse from storm disaster[J]. Central China Electric Power, 2012, 25(3): 77-81.
- [10] 高耸结构设计规范:GBJ 135-90[S].
- [11] BATTISTA R C, RODRIGUES R S, PFEIL M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1051-1067.
- [12] 王海涛,谷山强,吴大伟,等.基于数值天气预报的输电线路风偏闪络预警方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(12):121-127.
WANG Haitao, GU Shanqiang, WU Dawei, et al. Method for windage yaw flashover warning of transmission lines based on numerical weather prediction[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 121-127.
- [13] 熊小伏,翁世杰,王建,等.考虑降雨修正的干字型耐张塔跳线风偏放电在线预警方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(5):136-143.

- XIONG Xiaofu, WENG Shijie, WANG Jian, et al. An online early warning method for windage yaw discharge of jumper towards "JG" type strain tower considering corrected by rainfall[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 136-143.
- [14] 陈许霞, 季民, 宁方志. 基于 GIS 的格点精细化预报插值方法的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016(10): 69-71.
CHEN Xuxia, JI Min, NING Fangzhi. Research on Interpolation for fine forecast of meteorological grid[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016(10): 69-71.
- [15] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1978, 185(92): 301-317.
- [16] 徐童, 茅大钧. 基于 Copula 函数和 LU 分解法的汽轮机数据特征选择[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 125-130.
XU Tong, MAO Dajun. Data feature selection for steam turbine based on Copula function and LU decomposition method[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 125-130.
- [17] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
WANG Jian. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [18] 杨咏昕, 葛耀君, 项海帆. 风速风向联合分布的平均风统计分析[J]. 结构工程师, 2002(3): 29-36.
YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. Statistic analysis of wind speed based on the joint distribution of wind speed and wind direction[J]. Structural Engineer, 2002(3): 29-36.
- [19] 陈朝晖, 管前乾. 基于短期资料的重庆风速极值渐进分布分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(12): 88-92.
CHEN Zhaohui, GUAN Qianqian. Simulating of asymptotic distributions of extreme wind speed in Chongqing using short-term wind speed records[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(12): 88-92.
- [20] ULGEN K, HEPBASLI A. Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey[J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(6): 495-506.
- [21] SIMIU E, HECKERT N A. Extreme wind distribution tails: a "peaks over threshold" approach[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(5): 539-547.
- [22] 李宏男, 王杨, 伊廷华. 极值风速概率方法研究进展[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 15-26.
LI Hongnan, WANG Yang, YI Tinghua. Advance in research on extreme wind speed models[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(2): 15-26.
- [23] 王继霞, 申培萍. 定时截尾下 Weibull 分布参数估计的 EM 算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 9-11.
WANG Jixia, SHEN Peiping. EM algorithm for parameter estimation of Weibull distribution under timing censoring [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2009, 37(2): 9-11.
- [24] 刘健新, 马麟, 白桦. 杭州湾大桥观光塔风速风向联合分布[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 53-57.
LIU Jianxin, MA Lin, BAI Hua. Joint probability distribution of wind speed and direction of sightseeing tower in Hangzhouwan bridge[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(5): 53-57.
- [25] 谢天喜, 周志成, 陶风波, 等. 基于气象预报与设备状态评价的特高压输电线路故障率计算方法研究[J]. 电气应用, 2014(21): 24-28.
XIE Tianxi, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, et al. Research on failure rate calculation method of UHV transmission lines based on weather forecast and equipment state evaluation[J]. Electrical Application, 2014(21): 24-28.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

朱凌(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 高级技师, 研究方向为电力系统安全分析; E-mail: hzyxfs2199@163.com

陈涛威(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全分析; E-mail: 467511718@qq.com

周晨(1992—), 女, 通信作者, 硕士, 主要从事主输变电设备在线监控系统的研究。E-mail: whovin@163.com

(编辑 姜新丽)